

# Eficiencia energética y energías limpias



**OPEN**

OPORTUNIDADES  
DE MERCADO PARA  
ENERGÍAS LÍMPIAS  
Y EFICIENCIA  
ENERGÉTICA

# TERMOECONOMIA

Termoeconomía es la combinación de los conceptos termodinámicos y económicos en un sistema que permite evaluar las oportunidades de disminuir los consumos energéticos a la vez que los costos capitales es lo que se ha denominado en la actualidad

# Fundamentos de Termoeconomía

Antes de exponer los procedimientos en que se basa el análisis termoeconómico es necesario definir algunos conceptos que caracterizan los diferentes tipos de flujo exergético que pueden darse en la instalación: fueles, productos, exergía perdida y exergía destruida.

- Se define el *producto de un equipo como el resultado deseado, la finalidad para la que se adquiere y para la que opera.*
- El *fuel de un equipo está constituido por los* recursos utilizados para generar dicho producto.
- La *exergía perdida de un componente* es la exergía asociada a las corrientes exergéticas que salen de él sin ser aprovechadas por otro equipo de la instalación.
- la *exergía destruida por un equipo* es aquella que se calculó en el análisis ermodinámico a través de la ecuación de Gouy-Stodola.

## Ecuación básica de la Termoeconomía: balance exergético contable

$$\dot{C}_{s,k} = \dot{C}_{e,k} + \dot{Z}_k$$

donde:

$C_{s,k}$  es el coste exergético de todas las salidas del k-ésimo equipo,  
 $C_{e,k}$  es el coste exergético de todas las entradas del k-ésimo equipo,  
 $Z_k$  es el coste no exergético debido a los costes de operación y mantenimiento más los costes de capital del equipo k-ésimo.

$$\dot{C}_i = c_i \cdot \dot{E}_i$$

donde:

$C_i$  es el coste exergético de la corriente  $i$  en  $[\$/\text{tiempo}]$ ,  
 $c_i$  es el coste exergético unitario de la corriente  $i$   $[\$/\text{unidad exergética}]$ ,  
 $E_i$  es la potencia exergética de la corriente  $i$   $[\text{exergía}/\text{tiempo}]$ , obtenida mediante el análisis termodinámico.

# Ecuación básica de la Termoeconomía: balance exergético contable

$$\dot{Z} = \dot{Z}^{CI} + \dot{Z}^{OM}$$

Los costes de capital junto con los de operación y mantenimiento, no son costes exergéticos, y se calculan dividiendo la contribución anual total de estos costes por el número de horas al año que la planta se encuentra funcionando.

Este coste no exergético que se denota por  $Z$ , se obtiene para cada uno de los componentes en que se divide la planta. Son costes temporales [\$/tiempo], e indican cuánto cuesta mantener funcionando un equipo concreto por unidad de tiempo de funcionamiento. La forma en que se calculan se explica más adelante

# Ecuación básica de la Termoeconomía: balance exergético contable

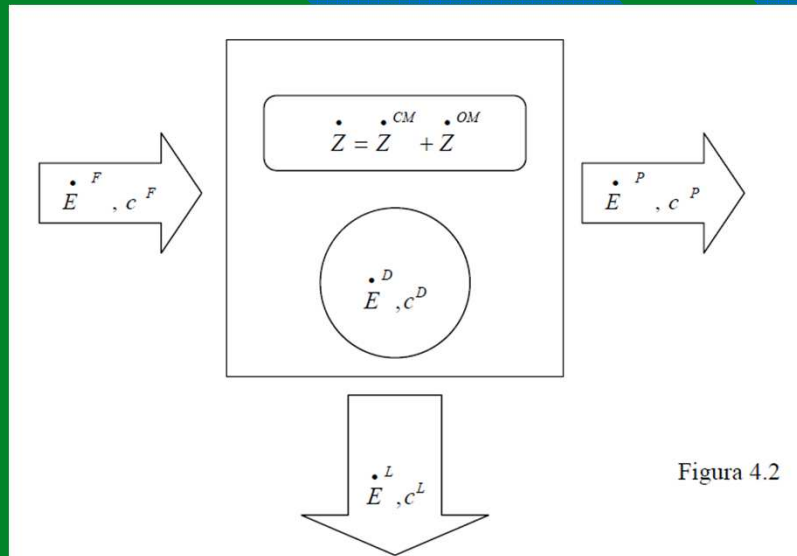


Figura 4.2

BALANCE EXERGÉTICO:

$$\dot{E}^P + \dot{E}^D + \dot{E}^L = \dot{E}^F$$

donde:

$\dot{E}$  es la potencia exergética,

y las letras P,D,L,F asocian una magnitud al producto, exergía destruida, exergía perdida y fuel respectivamente.

BALANCE CONTABLE:

$$\dot{C}^P + \dot{C}^L = \dot{C}^F + \dot{Z}$$

donde:

$\dot{C}$  es el coste temporal asociado a la categoría indicada por el superíndice.



# Variables termoeconómicas para la evaluación del sistema

## 1) RELACIÓN DE EXERGÍA DESTRUIDA

Es la relación entre la potencia exergética destruida y la potencia exergética del fuel de un componente genérico  $k$ .

$$\rho_{D,k} = \frac{\dot{E}_{D,k}}{\dot{E}_{F,k}}$$

## 2) RELACIÓN DE EXERGÍA PERDIDA

Es el cociente entre la potencia exergética perdida y la potencia exergética del fuel total de la planta.

$$\rho_{L,k} = \frac{\dot{E}_{L,k}}{\dot{E}_F}$$

## 3) RENDIMIENTO EXERGÉTICO

Se define como la relación entre la potencia exergética del producto y la potencia exergética del fuel de cada equipo.

$$\varepsilon_k = \frac{\dot{E}_{P,k}}{\dot{E}_{F,k}}$$

## 4) DIFERENCIA RELATIVA DE COSTE EXERGÉTICOS UNITARIOS PROMEDIO

Se define como el aumento relativo del coste exergético unitario promedio entre el fuel y el producto según la ecuación 4.19.

$$r_k = \frac{c_{P,k} - c_{F,k}}{c_{F,k}}$$

## 5) COEFICIENTE DE DISPONIBILIDAD

$$CD = \Delta \text{exergía} / \Delta \text{Energía}$$

Este parámetro se define como el cociente entre los incrementos de exergía y entalpía que sufre el fluido térmico

La exergía destruida es una magnitud imputable directamente al proceso que ocurre en la máquina, mientras que la exergía perdida es un subproducto no utilizado y por tanto no debe ser imputada a la máquina sino al sistema en su conjunto. Si otra máquina se introdujera en el sistema para aprovechar una corriente de exergía anteriormente perdida, ésta se correspondería con una corriente de fuel de la nueva máquina. En cambio, la exergía destruida es, como su propio nombre indica, posteriormente inutilizable.

La valoración de estas exergías ofrece diferentes alternativas. Uno de los objetivos del análisis termoeconómico es comprender la formación de costes y flujos monetarios del sistema además de optimizar el funcionamiento de cada componente y el sistema en su conjunto. Por ello, cada corriente exergética perdida o destruida debe ser valorada económicamente como una posibilidad de incremento de la eficiencia del sistema, y por tanto su valoración económica mediante la asignación de un coste exergético unitario debe cumplir estos objetivos.

# TERMoeconomía

¿Qué permite la termoeconomía que no permiten los análisis actuales del uso de la energía?

- Calcular los costes de cada producto generado en la planta.
- Comprender la formación de costes y flujos monetarios en el sistema.
- Optimizar variables específicas asociadas a cada uno de los componentes para obtener el mínimo costo del recurso energético.
- Optimizar el sistema completo para obtener el mínimo costo total energético.



# Metodología

Las etapas fundamentales para la aplicación del método termoeconómico son:

1. Balance exergético de los elementos y el sistema.
2. Determinación de los costos de las fuentes de energía.
3. Balance termoeconómico de los elementos y el sistema.
4. Determinación de los costos propios de los elementos.
5. Selección de las áreas de mayor potencial económico de perfeccionamiento.

# TERMOECONOMIA

**Balance exergetico de los elementos y el sistema.**

- El objetivo de este balance es la determinación del valor termodinámico de la exergía de cada corriente y de las pérdidas de disponibilidad de la energía que ocurren en cada proceso.

# TERMOECONOMIA

## Determinación de los costos de las fuentes de energía.

- Para la producción de energía térmica:

Costos de producción = Costos fijos del + Costos variables ,  
de vapor                      área de                      área de  
    generación                      generación

# TERMOECONOMIA

$$Costos\_Fijos = \frac{\left( \frac{Ng}{100} + \frac{R}{100} \right) \cdot I + S}{M_{Hp} \cdot A}$$

$A$  - horas de trabajo al año,  $h/año$ .

$Ng$  - tasa de amortización,  $\%/año$ .

$R$  - tasa de retorno de la inversión,  $\%/año$ .

$I$  - valor inicial de la inversión,  $\$$

$M_{Hp}$  - producción de vapor de alta presión,  $t/h$ .

$\alpha_F, \alpha_w, \alpha_q$  - precios del combustible, agua y productos químicos respectivamente en el generador de vapor,  $\$/t$

# TERMOECONOMIA

$$\textit{Costos\_Variables} = \frac{\left(\alpha_F \cdot F + \alpha_w \cdot W + \alpha_q \cdot Q\right) \cdot A + \textit{Otros\_Gastos}}{M_{Hp} \cdot A}$$

# TERMONECONOMIA

- Para las fuentes de energía eléctrica:

Si la energía eléctrica consumida es producida en la propia planta o sistema analizado su costo se determina del balance termoeconómico que se expondrá más adelante. En el caso que sea importada se toma el precio de compra al vendedor.



# TERMONECONOMIA

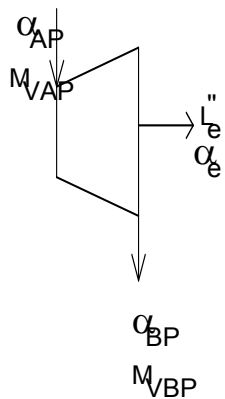
## 1. Balance termoeconómico de los elementos y el sistema.

Para las corrientes derivadas del vapor producido en las calderas (vapor de alta, media o baja presión y condensados) el precio se obtiene a partir de la siguiente expresión.

$$\frac{\alpha_{AP}}{e_{VAP}} = \frac{\alpha_{MP}}{e_{VMP}} = \frac{\alpha_{BP}}{e_{VBP}} = \frac{\alpha_{Cond}}{e_{Cond}} = \frac{\alpha_{...}}{e_{...}}$$

# TERMoeCONOMIA

Para las corrientes de energía eléctrica derivadas de las producidas en los Turbogeneradores de la propia planta o sistema analizado, el precio se determina a partir del balance termoeconómico del área de Turbogeneradores



$$\alpha_{AP} \cdot M_{VAP} + \text{Costos} \text{ -- Fijos -- Area} = \alpha_{BP} \cdot M_{VBP} + L_e'' \alpha_e$$

donde:

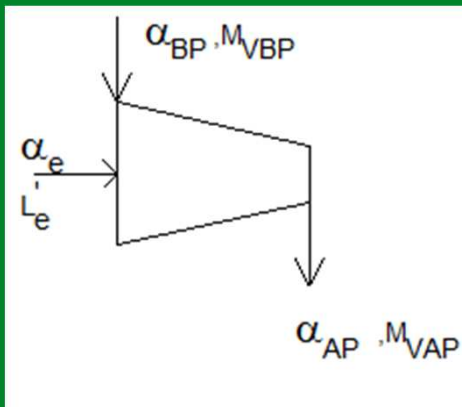
$M_{VAP}, M_{VBP}$  - flujo de vapor a la entrada y salida del Turbogenerador,  $t/h$

$L_e''$  - energía eléctrica producida,  $kW$ .

$\alpha_e$  - precio de la energía eléctrica producida,  $\$/kWh$ .

# TERMONECONOMIA

- Para las corrientes de aire comprimido, refrigerante o flujos obtenidos de estaciones de compresión alimentadas de energía eléctrica importada al sistema analizado, el precio de la corriente se obtiene del balance termoeconómico de la estación de compresión o bombeo:



$$\alpha_{BP} \cdot M_{VBP} + \alpha_e \cdot L_e^i + \text{Costos}_{\text{Fijos}_{\text{Estación}}} = \alpha_{AP} \cdot M_{VAP}$$

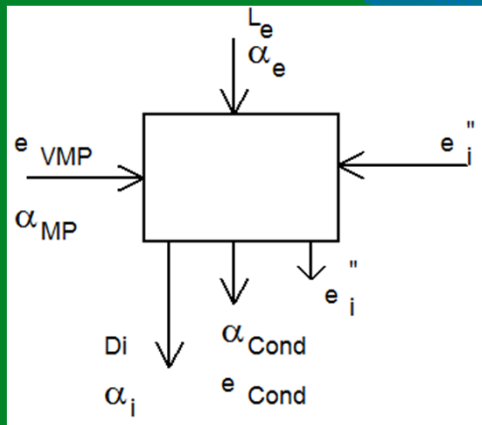
donde:

$L_e^i$  - energía eléctrica importada,  $kW$ .

$\alpha_e$  - precio de compra de la energía eléctrica importada,  $\$/kW$ .

# TERMOECONOMIA

El cálculo del valor económico de las pérdidas de disponibilidad de la energía en cualquier elemento, equipo, subsistema o sistema se determina según el modelo de análisis:



$$\alpha_i = \frac{\alpha_e \cdot L_e + \alpha_{MP} \cdot e_{VMP}}{L_e + e_{VMP}}, \$/kWh$$

$$D_i = L_e + e_{VMP} + e_i' - e_i'' - e_{Cond}, kW$$

$$C_i = \alpha_i \cdot D_i = \alpha_i \cdot T_0 \cdot \Delta S_i, \$/h$$

donde:

$L_e, e_{VMP}$  - exergías de las corrientes que aportan energía disponible al elemento,  $kW$ .

$e_i', e_i''$  - exergías de las corrientes que varían su energía disponible en el elemento,  $kW$ .

$C_i$  - valor económico de las pérdidas de energía disponible en el elemento  $i$ ,  $\$/h$ .

$T_0$  - temperatura del medio,  $K$ .

$\Delta S_i$  - variación total de entropía en el elemento  $i$ ,  $kW/K$ .

$e_{Cond}$  - exergía de salida del elemento,  $kW$ .

$\alpha_e, \alpha_{MP}, \alpha_{Cond}$  - precios de las corrientes expresadas en  $\$/kWh$ .

# TERMOECONOMIA

## 1. Determinación de los costos propios de los elementos.

El objetivo de esta etapa es determinar el valor económico del equipo, subsistema o sistema donde se producen los procesos objeto de análisis en el momento en que este se efectúa. El costo propio se determina a partir de la depreciación y el retorno anual de la inversión:

# TERMOECONOMIA

$$C_p = D + R, \$ / h$$

$$D = \frac{C \cdot C}{V_u \cdot A}, \$ / h$$

$$R = \frac{T}{100} \cdot \frac{C \cdot C}{A}, \$ / h$$

$D$  - depreciación horaria,  $\$/h$ .

$C.C$  - costo capital del elemento, equipo, subsistema o sistema,  $\$$ .

$V_u$  - vida útil, *años*.

$T$  - tasa de retorno o porcentaje de recuperación anula del costo capital,  $\%/ \text{año}$ .

$A$  - horas de trabajo al año,  $h/ \text{año}$ .

$C_p$  - costo propio,  $\$/h$ .



# TERMOECONOMIA

## 1. Selección de las áreas de mayor potencial económico de perfeccionamiento.

La selección de las áreas de mayor potencial económico de perfeccionamiento energético se realiza mediante un análisis cualitativo de la comparación del valor económico de las pérdidas de energía disponible en el área y el valor del costo propio.

# TERMOECONOMIA

<i>Casos</i>	<i>Costo propio, \$ / h</i>	<i>Valor de las pérdidas, \$ / h</i>	<i>Potencial económico de perfeccionamiento</i>
<i>1</i>	Bajo	Alto	Alto
<i>2</i>	Alto	Bajo	Bajo
<i>3</i>	Alto	Alto	Analizar envejecimiento de la tecnología utilizada
<i>4</i>	Bajo	Bajo	Bajo Analizar el peso de las pérdidas en todo el sistema

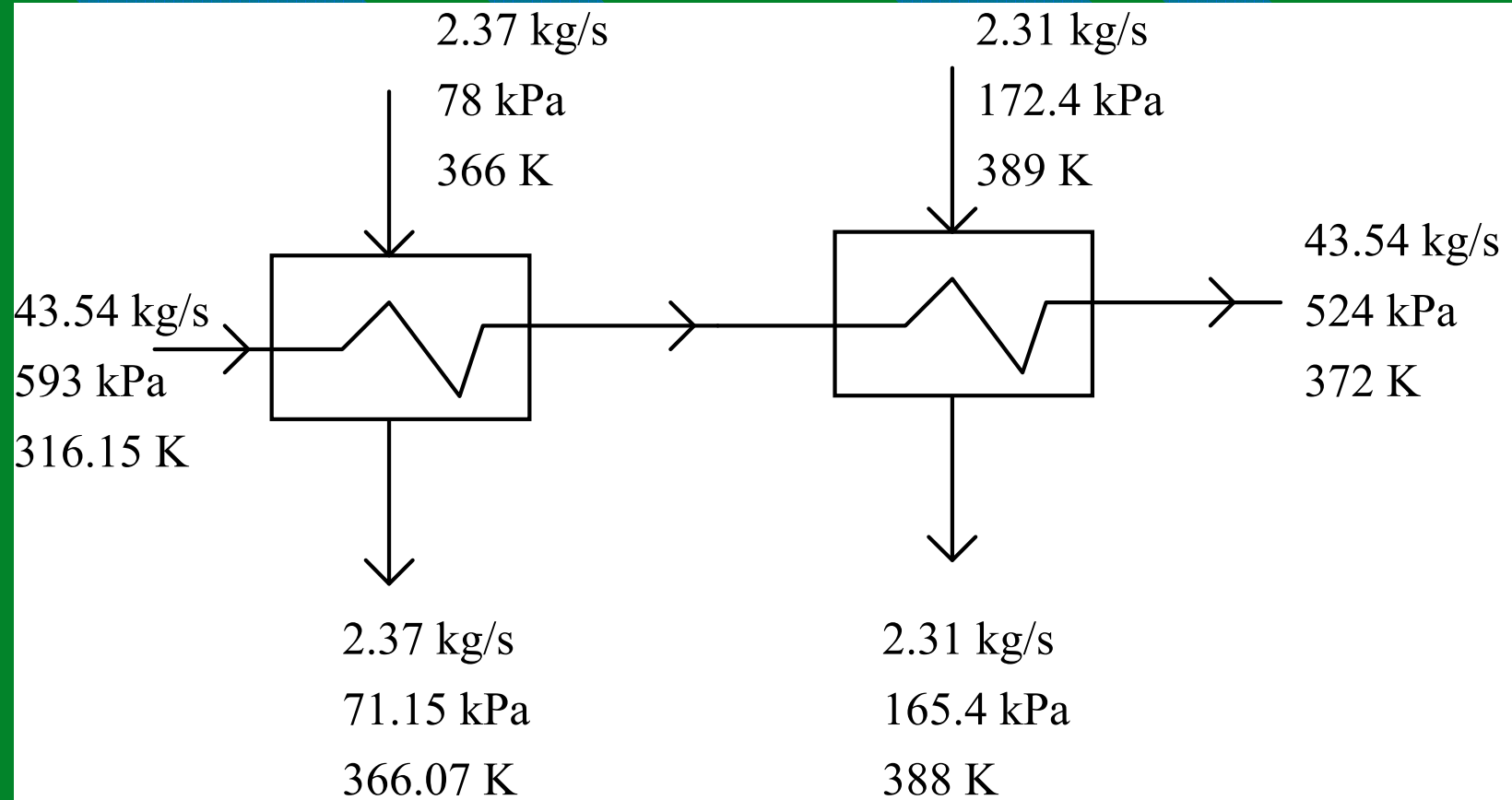
# TERMOECONOMIA

Una vez seleccionado el área de alto potencial, el ingeniero puede evaluar cual alternativa de inversión será la más conveniente para disminuir el valor de las pérdidas incrementando lo menos posible el costo propio del elemento, equipo, subsistema o sistema y seleccionando el tiempo de recuperación de su inversión en el plazo más conveniente.

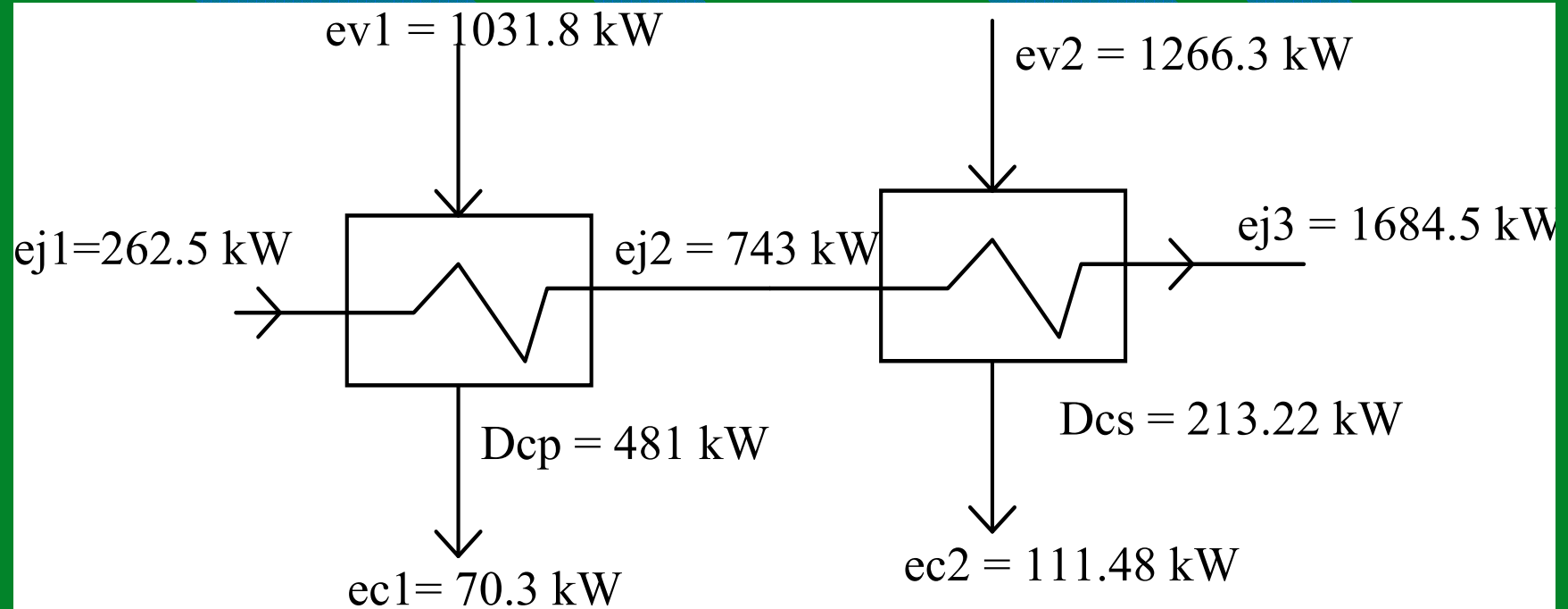
# TERMOECONOMIA

1. Aplicación del método termoeconómico a la localización de áreas de mayor potencial de perfeccionamiento energético en el proceso de calentamiento del jugo de una fábrica de azúcar .

# TERMOECONOMIA



# TERMOECONOMIA





# TERMOECONOMIA

Conociendo que el valor de la energía disponible del vapor es de 13 ¢ /KWh, para el vapor de 172,4 Kpa y 10 ¢ para el vapor de 78 Kpa, se determina el valor económico de la energía disponible perdida en cada calentador de jugo.

$$C_{cp} = 10 \text{ ¢ /KWh} * 481 \text{ kW} = 48,1 \text{ \$/h.}$$

$$C_{cs} = 13 \text{ ¢ /KWh} * 213.22 \text{ kW} = 27.7 \text{ \$/h.}$$

# TERMOECONOMIA

*Determinación del costo propio.*

<i>Equipo</i>	<i>C.C</i> <i>\$</i>	<i>D</i> <i>\$/año</i>	<i>R</i> <i>\$/año</i>	<i>Cp</i> <i>\$/h</i>
<i>Calentador primario</i>	10090	1130	1210	0.76
<i>Calentador secundario</i>	10090	1130	1210	0.76

# TERMONECONOMIA

<i>Equipo</i>	<i>C<sub>p</sub></i> \$/h	<i>C<sub>i</sub></i> \$/h	<i>Potencial</i>
<i>Calentador primario</i>	0.76	48.1	Muy Alto
<i>Calentador secundario</i>	0.76	27.7	Alto

# Eficiencia energética y energías limpias



**OPEN**

OPORTUNIDADES  
DE MERCADO PARA  
ENERGÍAS LÍMPIAS  
Y EFICIENCIA  
ENERGÉTICA